Analoge modulatie

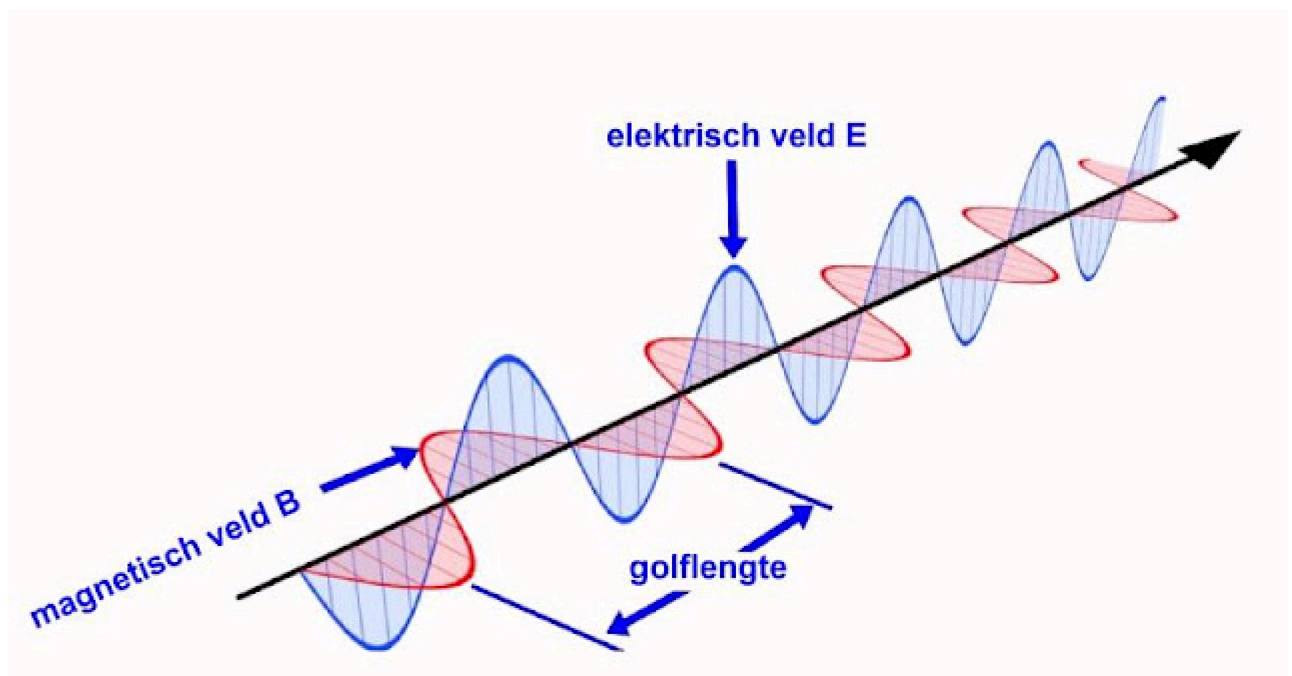
Analoge modulatie is het proces waarbij een eigenschap van een sinusvormige hoogfrequente draaggolf wordt gevarieerd door een laagfrequent informatiesignaal, zodat die informatie efficiënt kan worden overgedragen via een transportmiddel.

Auteur: Jos Verstraten, Maastricht, Nederland
Email: verstraten-1947@outlook.com
Publicatiedatum: 24-02-2026

Inleiding

De wereld draait op datacommunicatie
Datacommunicatie is het versturen van gegevens van de ene plaats naar de andere. Dat kan bijvoorbeeld door middel van rooksignalen, Chappe seintorens, lichtsignalen, elektriciteit geleidende kabels en via koeriers. Sinds de wetenschap het bestaan van elektromagnetische golven heeft aangetoond en geleerd deze voor eigen gebruik te benutten, gebruiken wij vaak deze golven voor draadloze datacommunicatie. Zij kunnen immers worden uitgezonden en ontvangen via relatief eenvoudige elektronische apparatuur en verplaatsen zich razendsnel over zeer grote afstanden. Bovendien hebben zij geen duur transportmiddel, zoals koperen kabels of glasvezel, nodig. Zij planten zichzelf voort door de ruimte.

Elektromagnetische golven
Het was reeds in de achttiende eeuw opgevallen dat een elektrische wisselspanning, die tussen twee vrij in de ruimte opgehangen geleiders werd aangebracht, in de ruimte rond de geleiders '*iets*' veroorzaakte. Dat '*iets*' kon op een andere plaats weer worden opgevangen door op die plaats ook twee vrije geleiders in de ruimte op te hangen. Tussen die twee geleiders werd een zeer kleine wisselspanning gemeten, met dezelfde frequentie als deze van het signaal dat het '*iets*' had veroorzaakt.
Het was de wetenschapper Heinrich Rudolf Hertz die in 1886 dit verschijnsel wetenschappelijk en wiskundig onderzocht en de theorie van de elektromagnetische straling uitwerkte. Volgens deze theorie veroorzaakt een wisselspanning die tussen twee vrije geleiders wordt aangebracht twee loodrecht op elkaar staande velden in de ruimte, een elektrisch veld E en een magnetisch veld B, die elkaar wederzijds onderhouden en zich met de snelheid van het licht (ongeveer 300.000 km/s) door de ruimte voortplanten. Deze twee golven kunnen voorgesteld worden volgens de onderstaande figuur.



Voorstelling van een elektromagnetische golf in de ruimte.
(© https://physics.stackexchange.com)

Een elektromagnetische golf wordt gekenmerkt door de golflengte λ (lambda). Tussen de frequentie en de golflengte kan de volgende relatie worden opgesteld:

$\lambda = c / f$

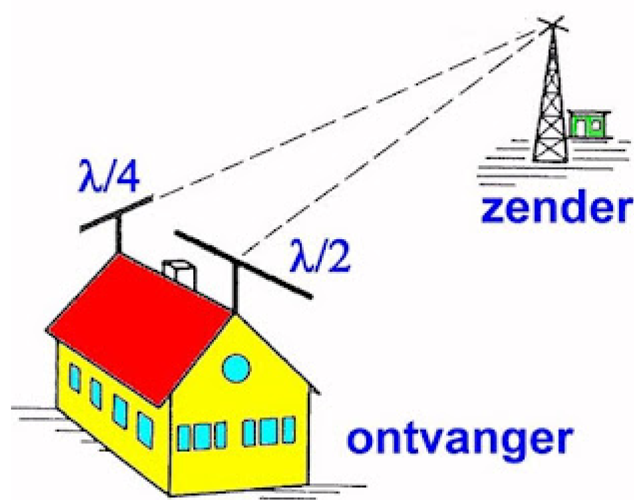
waarin:

- c: de voortplantingssnelheid is van de elektromagnetische golf, dus de lichtsnelheid.
- f: de frequentie van de elektromagnetische golf is.

Uit deze formule kunt u berekenen dat een elektromagnetische golf met een frequentie van 20 kHz een golflengte van niet minder dan 15.000 m (15 km) heeft!

Antennes

De systemen waarmee elektromagnetische straling worden uitgezonden en ontvangen noemt men '*antennes*'. Er moet een bepaalde relatie bestaan tussen de golflengte van de uit te zenden straling en de afmetingen van de antennes, zie de onderstaande figuur. De standaard is een halve golflengte voor een '*dipool*'-antenne of een kwart golflengte voor een '*whip*'-antenne. Dit is de voornaamste reden waarom het niet mogelijk is geluid (met een bandbreedte van 20 Hz tot 20 kHz) rechtstreeks als elektromagnetische straling uit te zenden en weer op te vangen. De afmetingen van de antennes zouden, vanwege de zeer grote golflengte van de straling, volledig onhandelbaar worden!



Ontvangen van elektromagnetische golven door middel van een antenne.
(© 2026 Jos Verstraten)

Ook via kabels is analoge modulatie mogelijk
De gemoduleerde elektrische signalen die elektromagnetische golven opwekken kunnen echter ook rechtstreeks via kabels worden verzonden. Dat geldt zowel voor koperen kabels als voor glasvezelkabels. In dat laatste geval is er uiteraard een extra stap nodig, namelijk het omzetten van de elektrische signalen in licht (zender) en het weer omzetten van de lichtsignalen in elektrische spanningen (ontvanger). Dat doet aan het principe van analoge modulatie via de kabel echter niets af.

Waarom is modulatie noodzakelijk?
Modulatie is noodzakelijk om laagfrequente informatie, zoals spraak, audio, video en data, fysisch en technisch efficiënt te kunnen transporteren via een veel hoogfrequenter transportmiddel. Zonder modulatie zou draadloze telecommunicatie praktisch onuitvoerbaar zijn. Een van de redenen hebben wij al beschreven: de noodzakelijke lengtes van de antennes bij het niet gebruiken van een hoogfrequente draaggolf zouden onhandelbaar worden. Moduleert u echter spraak op een draaggolf van 100 MHz, dan moeten de antennes een lengte van slechts 75 cm hebben.

Efficiënte energieoverdracht
Elektromagnetische straling wordt veel efficiënter uitgezonden bij hoge frequenties.

Meerdere signalen tegelijk transporteren
Door het toepassen van modulatie kunt u diverse signalen gelijktijdig uitzenden. Het volstaat ieder signaal op een eigen draaggolf met een specifieke frequentie te moduleren. Dat principe wordt al heel lang toegepast om de koperen telefoonkabels die op de bodem van de oceanen liggen zo efficiënt mogelijk te gebruiken. Door één en dezelfde kabel kan men een heleboel spraaksignalen versturen door diverse draaggolf frequenties te gebruiken. Hetzelfde principe wordt toegepast bij de koperen of coaxiale netwerken die internet, radio, TV en telefonie in uw woonkamer binnenbrengen. Al die signalen worden gemoduleerd op draaggolven met verschillende frequenties.

Selectiviteit, versterking en filtering
Hoogfrequente signalen kunnen heel nauwkeurig gefilterd worden uit een mengelmoes van allerhande elektrische golven door middel van LC-kringen en kristalfilters. De frequenties van de diverse draaggolven kunnen dus heel dicht bij elkaar liggen. Dat zou veel en veel moeilijker gaan met LF-signalen. HF-signalen kunnen bovendien worden versterkt met een zeer hoge versterkingsfactor door gebruik te maken van vrij eenvoudige schakelingen met afgestemde filters. Uiteraard zijn dát de principes waardoor er honderden radio- en TV-zenders hun signaal gelijktijdig kunnen uitstralen en u in staat bent één van die zenders storingsvrij te ontvangen.

Analoge modulatie versus digitale modulatie
In dit artikel worden uitsluitend analoge modulatietechnieken besproken. Deze kenmerken zich doordat de hoogfrequente draaggolf sinusvormig verloopt. Naast analoge modulatie bestaan er ook digitale modulatietechnieken.

Soorten analoge modulatie
Zonder analoge modulatie zou u geen internet, geen radio- en TV-ontvangst en geen mobiele telefonie hebben, om maar enige toepassingen te noemen. In de loop der geschiedenis heeft men een aantal modulatie-technieken ontwikkeld, ieder met specifieke voor- en nadelen en eigen toepassingen. In dit artikel maakt u kennis met:

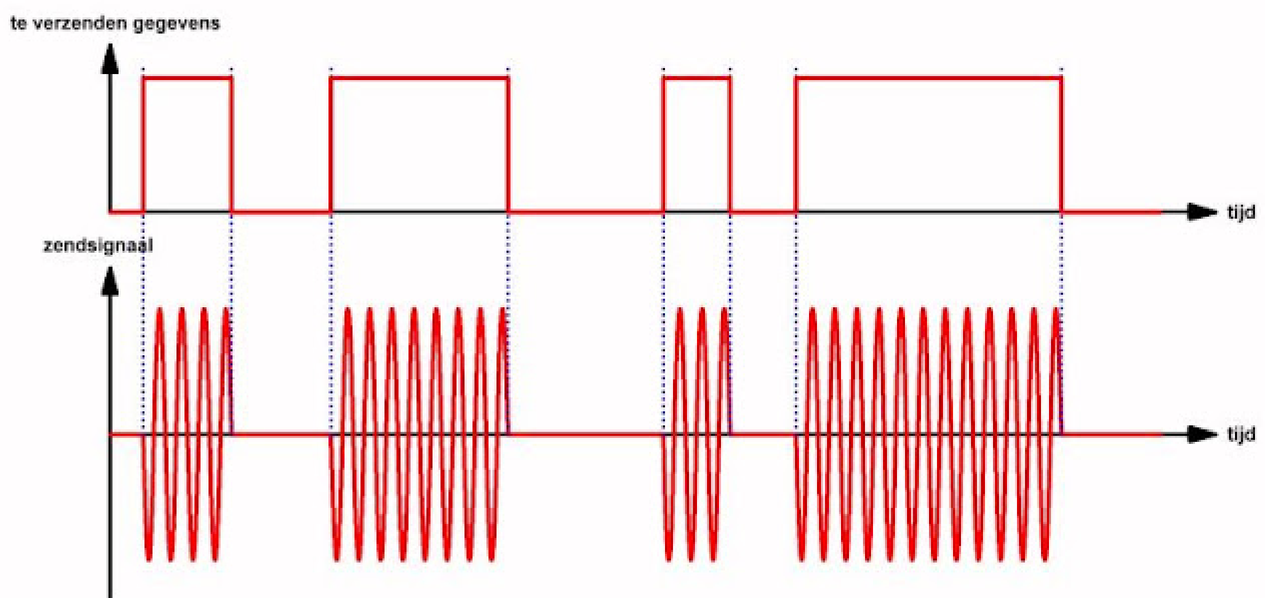
- On-off keying (OOK)
- Binary phase shift keying (BPSK)
- Amplitude modulatie (AM)
- Enkelzijband modulatie (SSB)
- Frequentie modulatie (FM)
- Fase modulatie (PM)
- Amplitude shift keying (ASK)

- Frequency shift keying (FSK)
- Audio frequency shift keying (AFSK)
- Phase shift keying (PSK)
- Quadrature amplitude modulation (QAM)

Dit lijstje is alles behalve compleet, er zijn zeer exotische modulatietechnieken ontwikkeld die echter zo gespecialiseerd zijn dat wij ze niet gaan behandelen.

On-off keying (OOK)

Hoe werkt het?
On-off keying is een zeer eenvoudige modulatiemethode waarbij een draaggolf wordt in- of uitgeschakeld om een seriële digitale datastroom te coderen. Als in de seriële datastroom een bit aanwezig is, wordt de draaggolf uitgezonden. Is geen bit aanwezig, dan wordt de draaggolf volledig onderdrukt.



Het principe van on-off keying. (© 2026 Jos Verstraten)

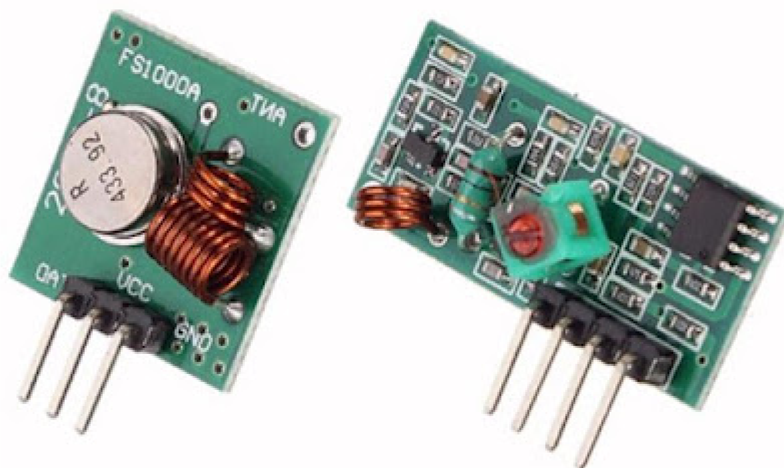
Toepassingen
On-off keying wordt veel toegepast in goedkope systemen voor afstandsbedieningen over korte afstanden, zoals garagedeur openers, weerstations en eenvoudige domotica modules, zoals het bekende '*KlikAanKlikUit*' systeem. Officieel heten deze toepassingen '***S**hort **R**ange **D**evices*' (SRD).

Toegewezen frequenties
Er zijn bepaalde frequentiebanden toegewezen voor on-off keying toepassingen:

- 315 MHz:
  Veel gebruikt in Amerika en Azië.
- 433 MHz:
  Dé standaard in Europa voor '*Short Range Devices*'.
- 868 MHz:
  Vaak gebruikt in Europa voor apparaten die een groter bereik nodig hebben dan wat in de 433 MHz band mogelijk is.
- 915 MHz:
  Het Amerikaans equivalent van de Europese 868 MHz band.
- 2,4 GHz:
  Hoewel hier vaker complexe modulatie (zoals Wi-Fi of Bluetooth) wordt gebruikt, ondersteunt de algemene ISM-specificatie ook in deze band OOK.

In Nederland houdt de '*__R__ijksinspectie __D__igitale __I__nfrastructuur*' (RDI) toezicht op het gebruik van deze banden. Hoewel deze banden vergunningsvrij zijn, gelden er strikte regels voor het zendvermogen. In het volledige 433,05 MHz tot 434,79 MHz bereik is het zendvermogen bijvoorbeeld beperkt tot 10 mW ERP (*__E__ffectieve __R__adiated __P__ower*). Ook gelden er bepaalde beperkingen over hoe lang een apparaat achter elkaar mag zenden om te veel zendsignalen op hetzelfde moment te voorkomen. Vandaar dat alle zendapparaten die van deze techniek gebruik maken werken door het uitzenden van korte '*telegrammen*' die een bepaalde instructie naar de ontvanger zenden. Een dergelijk telegram bestaat uit een adres-code (ID) en een commando-code. Aan de hand van de adres-code kunnen alle 433 MHz ontvangers binnen het bereik van de zender afleiden voor wie het telegram bestemd is. Dank zij deze communicatie via korte telegrammen met ID's kunt u in uw huis zowel zenders en ontvangers van '*KlikAanKlikUit*' toepassen, een draadloos weerstation installeren en een elektronisch te openen garagepoort gebruiken zonder dat deze drie systemen elkaar in de weg zitten.

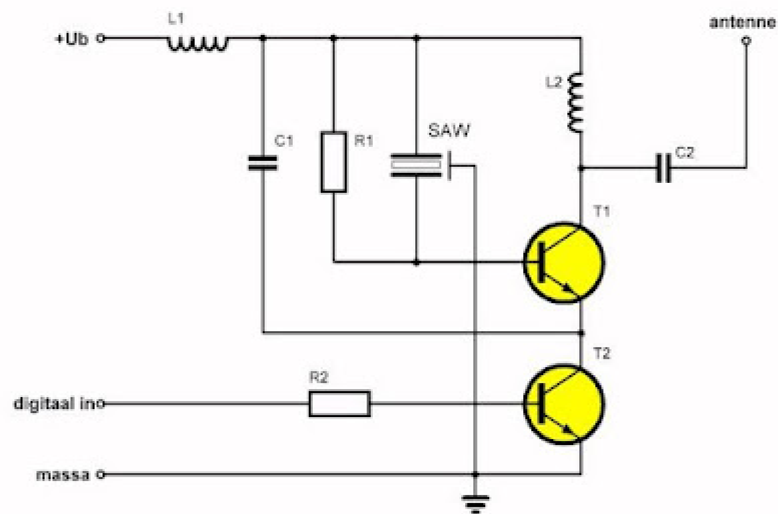
Doe-het-zelven met on-off keying in de 433 MHz band
Deze modulatietechniek is ideaal voor het zélf ontwerpen van eenvoudige afstandsbedieningen. De noodzakelijke zenders en ontvangers zijn immers spotgoedkoop. Het systeem is echter niet 100 % betrouwbaar. Als twee zenders toevallig precies op hetzelfde moment een telegram versturen is de kans groot dat beide signalen met elkaar interfereren en dat de ontvangers de telegrammen niet als eigen beschouwen en er niets mee doen.
Er bestaan tientallen modules die een signaal van 433 MHz genereren en die een data-aansluiting hebben om er OOK-modulatie op toe te passen. Ook voor het ontvangen en demoduleren van zo'n signaal kunt u kiezen uit tientallen printjes. Als voorbeeld ziet u op de onderstaande foto de uiterst goedkope set FS1000A die uitstekend bruikbaar is voor het uitvoeren van uw allereerste experimenten. De bodemprijs die wij voor deze Chinese set vonden bedraagt slechts € 2,50. Let er bij het bestellen op dat u de frequentie moet specificeren. De set wordt namelijk zowel met een frequentie van 433 MHz als 315 MHz geleverd.



Goedkope 433 MHz on-off keying zend/ontvangers. (© benselectronics.nl)

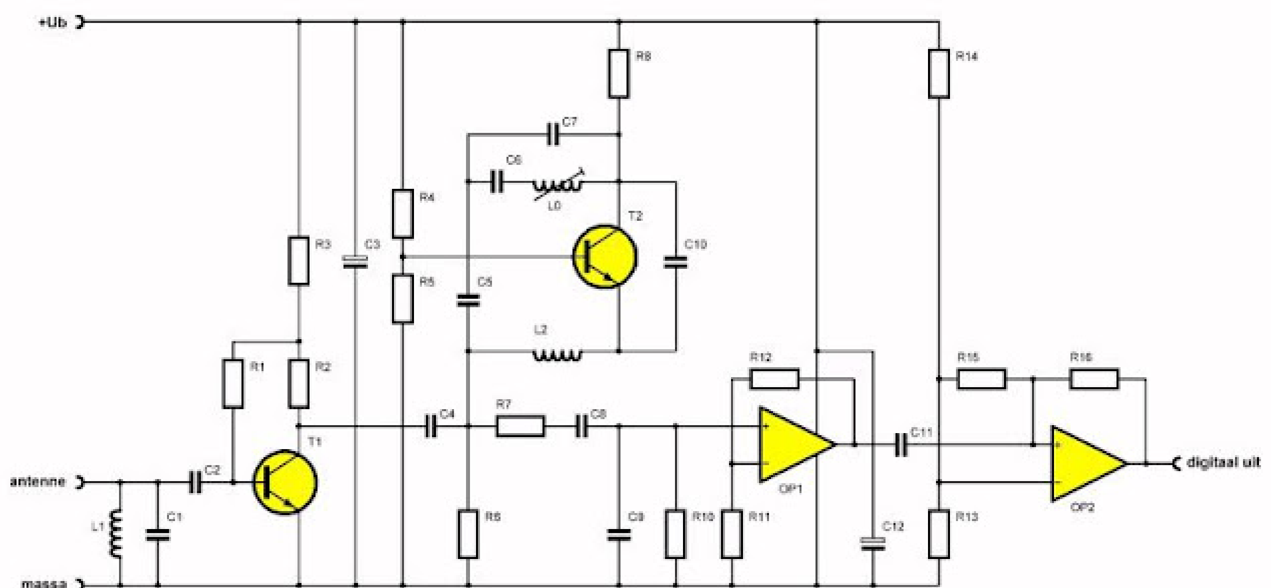
Het schema van de zendermodule
Het schema van deze module is getekend in onderstaande figuur. De transistor T1 is de oscillator. De SAW-resonator is opgenomen tussen de collector en de basis en zorgt dus voor het vervullen van de oscillatie-voorwaarde van de schakeling. Alleen ruis met een frequentie van 433,92 MHz wordt rondgekoppeld en zal dus steeds meer worden versterkt tot er een mooi zendsignaal met deze frequentie ontstaat. Dit signaal wordt via een LC-kring gekoppeld aan de antenne. Het zendsignaal vloeit uiteraard ook door dit spoeltje L2. Rond dit spoeltje ontstaat dus een elektromagnetisch veld en het is dit veld dat er verantwoordelijk voor is dat de module ook zonder antenne een klein zendbereik heeft.
De OOK-modulatie wordt op een wel heel primitieve manier verzorgd door T2. Als u de basis van deze transistor stuurt met een 'L' zal de transistor sperren. Transistor T2 wordt stroomloos en houdt uiteraard op met oscilleren. Stuurt u een 'H' in de basis, dan gaat T2 geleiden en

wordt de oscillator rond T1 aan het werk gezet.



Het schema van de FS1000A zender. (© 2026 Jos Verstraten)

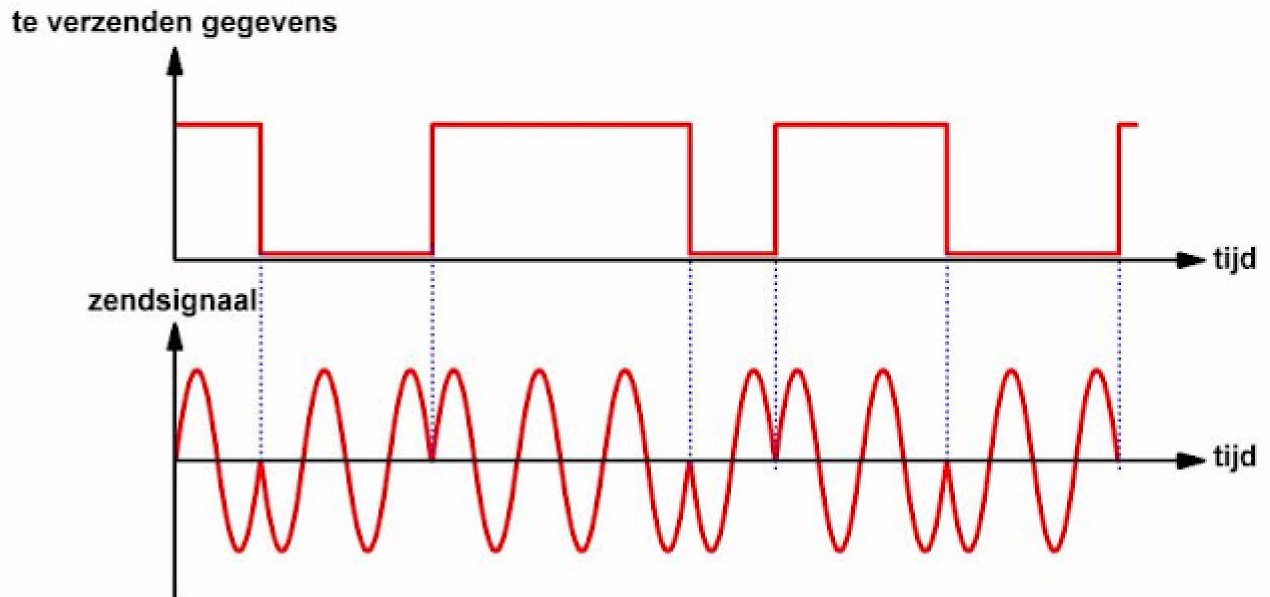
Het schema van de ontvangstmodule
Er zijn diverse versies van de module in omloop met kleine variaties in het schema en in de print. Toch komt de elektronica in grote lijnen overeen met wat wij in onderstaand schema hebben getekend.
Het antennesignaal wordt aangeboden aan een resonantiekring L1/C1 die is afgestemd op de zenderfrequentie. Nadien volgt een transistorversterker rond T1. Het versterkte signaal wordt uitgevoerd via de scheidingscondensator C4. Rond transistor T2 is een eenvoudige spanningsgestuurde verzwakker samengesteld. Deze sluit een kleiner of groter deel van het signaal over R6 kort naar de voedingsspanning. Op deze manier zal de schakeling maximaal versterken als er geen signaal wordt ontvangen en zal er minimaal versterkt worden als een mooi 433 MHz signaal wordt ontvangen. Via het afstembaar spoeltje L0 kunt u deze kring precies afregelen op de zenderfrequentie.
Het signaal wordt nadien weer versterkt door de schakeling rond OP1. De kleine bandbreedte van deze versterker zorgt ervoor dat alleen de omhullende van de 433 MHz bursts wordt doorgekoppeld. Op-amp OP2 is als comparator met hysteresis geschakeld, die verantwoordelijk is voor het omzetten van het OOK-gemoduleerde signaal in een mooie digitale puls.



Het schema van de FS1000A ontvanger. (© 2026 Jos Verstraten)

Binary phase shift keying (BPSK)

Hoe werkt het?
Binary phase shift keying is een digitale modulatietechniek die wordt gebruikt om bits ('L' en 'H') via een draaggolf te verzenden. Het systeem werkt door de fase van de draaggolf te inverteren bij het moduleren van een hoog bit. Deze tweefasen-benadering maakt BPSK tot een van de eenvoudigste vormen van fasemodulatie (lees verder). Nadeel is wel dat het verzenden van gegevens heel traag verloopt omdat de ontvanger, voor het vaststellen van de fase en de frequentie van de draaggolf, wel wat periodes nodig heeft.

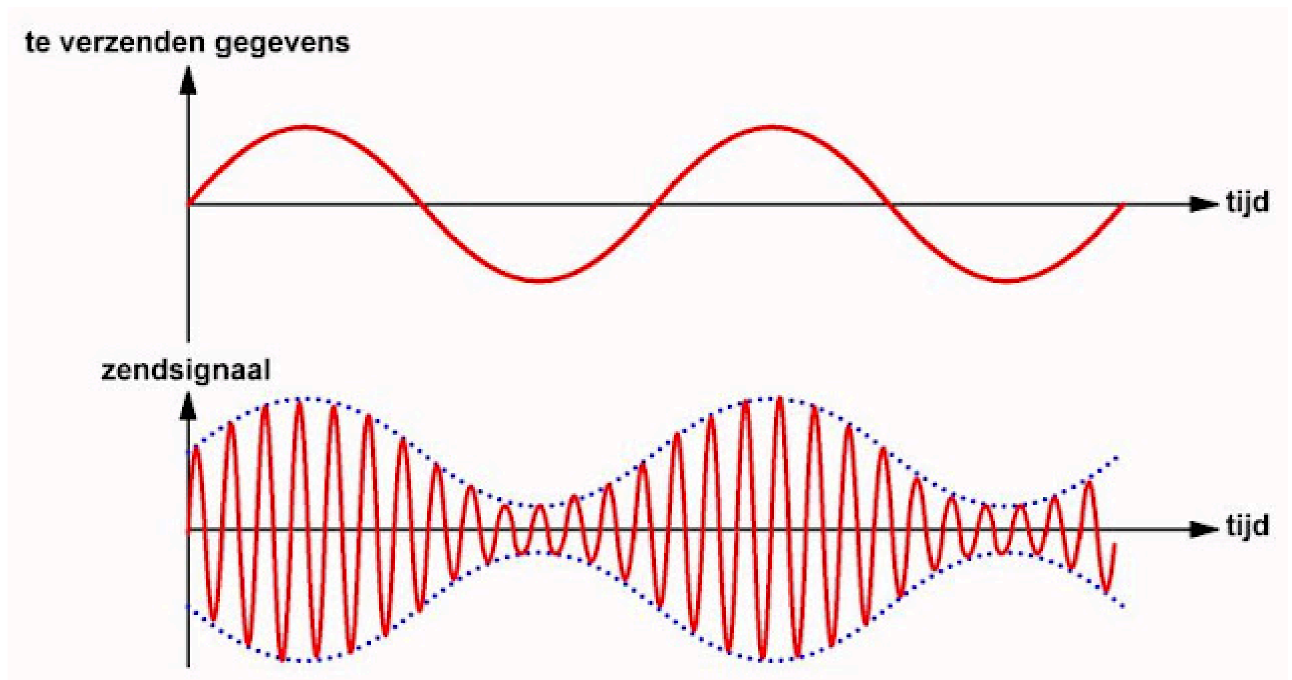


De werking van binary phase shift keying. (© 2026 Jos Verstraten)

Toepassingen
BPSK wordt veel gebruikt in satelliet links vanwege de hoge betrouwbaarheid bij lange-afstand communicatie. Het ontvangen signaal is zeer betrouwbaar te decoderen, zelfs als het verdronken zit in ruis. Vandaar dat BPSK ook vaak wordt toegepast in de ruimtevaart, bijvoorbeeld voor het versturen en ontvangen van foto's van andere planeten. Dat de communicatie heel traag verloopt is hierbij geen nadeel. Een ander voordeel is dat de elektronica voor het coderen van het zendsignaal niet complex is en dus gemakkelijk in satellieten kan worden ingebouwd.

Amplitude modulatie (AM)

Hoe werkt het?
Amplitude modulatie is per definitie ontwikkeld voor het moduleren van analoge laagfrequent signalen, zoals spraak en muziek. Zoals uit de onderstaande figuur blijkt, wordt de informatie bij AM verborgen in de momentane waarde van de draaggolf. De amplitude van de draaggolf varieert op het ritme van het LF-signaal. De draaggolf is sinusoidaal, de LF-informatie kan iedere gewenste vorm hebben. In het getekende voorbeeld verloopt het LF-signaal ook sinusoidaal.



De werking van amplitude modulatie. (© 2026 Jos Verstraten)

Het frequentiespectrum

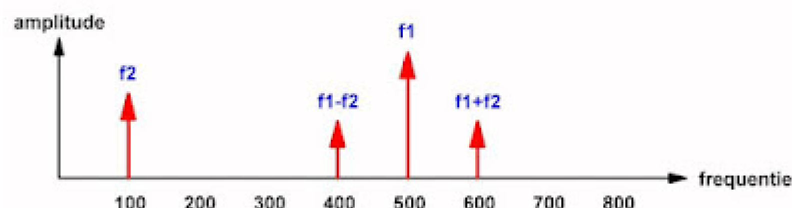
De in amplitude gemoduleerde draaggolf zélf is geen zuiver sinusvormig signaal. De amplitude van de diverse periodes is immers niet constant. Zoals u waarschijnlijk weet kunt u ieder periodiek signaal dat een van een zuivere sinus afwijkende vorm heeft, voorstellen door de som van een aantal zuivere sinusvormige signalen met verschillende frequenties en amplitudes. Dat is een gevolg van de wiskundige theorie, die men fourier-analyse noemt. Dat geldt dus ook voor een AM-signaal. Deze analyse noemt men het '*frequentiespectrum*' bepalen.

AM-modulatie van een sinusvormig signaal

Moduleert u een draaggolf met frequentie f_1 met een sinusvormig signaal met frequentie f_2, dan zal het frequentiespectrum van het gemoduleerde signaal niet alleen signalen met de frequenties f_1 en f_2 bevatten, maar ook nog twee signalen met de verschilfrequentie (f_1 - f_2) en de somfrequentie (f_1 + f_2). Dit is voorgesteld in de onderstaande grafiek.
Het totale signaal bestaat dus uit samenstellende signalen met frequenties van:

- f_2
- f_1 - f_2
- f_1
- f_1 + f_2

De in de figuur ingevulde numerieke waarden zijn maar als voorbeeld genomen om het principe duidelijk te maken, maar zijn uiteraard onrealistisch.

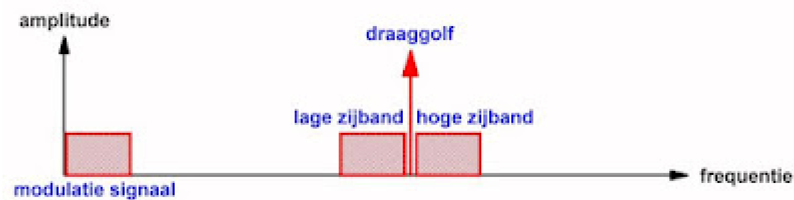


Het frequentiespectrum bij AM-modulatie van een sinus. (© 2026 Jos Verstraten)

AM-modulatie van een complex signaal

Moduleert u de draaggolf met een signaal dat een volledig frequentiespectrum bevat, bijvoorbeeld een spraak- of muzieksignaal, dan zal het duidelijk zijn dat er in het gemoduleerde signaal twee frequentiebanden ontstaan, die naast de frequentie van de draaggolf gelegen zijn. Dit wordt voorgesteld in de onderstaande figuur. Deze twee frequentiebanden noemt men de '*zijbanden*' van het amplitude gemoduleerde signaal. Die

zijbanden zijn even breed als de bandbreedte van het signaal dat wordt gemoduleerd.



Het frequentiespectrum bij AM-modulatie van een complex signaal.
(© 2026 Jos Verstraten)

Deze eigenschap van een AM-signaal is zeer belangrijk! Het zal duidelijk zijn dat het niet volstaat in de ontvanger alleen het signaal met de draaggolf frequentie te versterker. De ontvanger moet in staat zijn een bepaald frequentiegebied rond de draaggolf frequentie te verwerken. De zijbanden mogen immers niet verzwakt worden, want zij bevatten de LF-informatie. Vandaar dat een AM-ontvanger een bepaalde bandbreedte moet hebben. Dat is een frequentieband rond de draaggolf frequentie waarin alle voorkomende frequenties even veel versterkt moeten worden.

De modulatiediepte m bij AM

Een van de belangrijkste specificaties van een AM-signaal is de 'modulatiediepte', voorgesteld door de letter m. Deze grootheid wordt grafisch toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur.

De ongemoduleerde draaggolf (links) heeft een amplitude die gelijk is aan H. In de rechter grafiek is dezelfde draaggolf getekend, maar nu gemoduleerd. Door deze modulatie gaat de amplitude van de draaggolf variëren en wel tussen een bepaald minimum en een bepaald maximum, symmetrisch gelegen rond de waarde H. De maximale afwijking in de amplitude wordt voorgesteld door N.

De modulatiediepte m, met als eenheid %, wordt nu gedefinieerd door de formule:

m = [N / H] • 100 %

Stel dat:

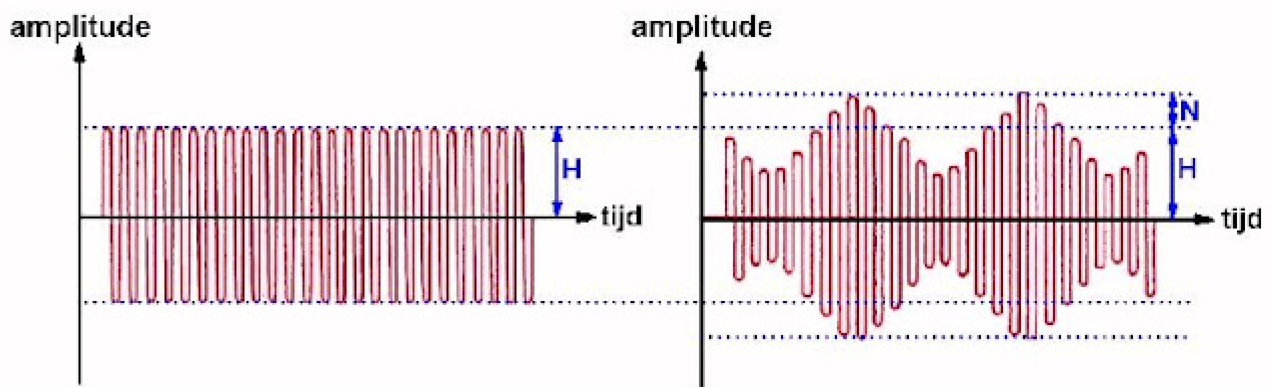
H = 500 mV

N = 50 mV

Dan is:

m = [50 / 500] • 100 %

m = 10 %

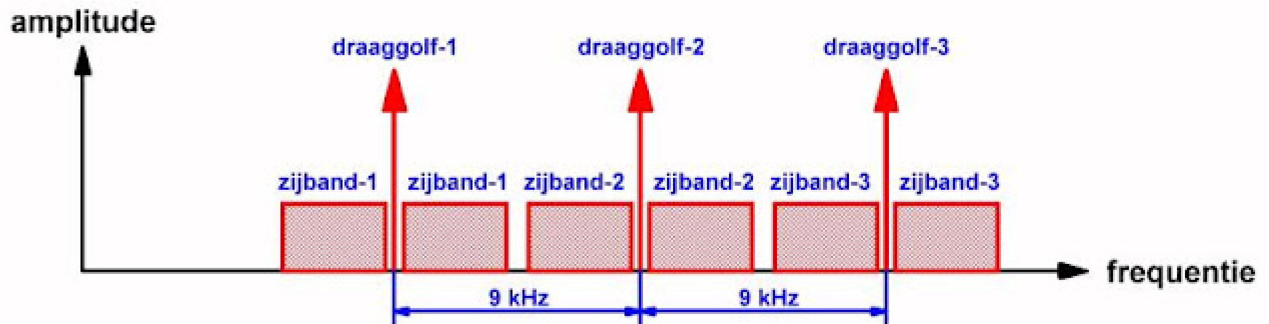


Definitie van de modulatiediepte bij AM. (© 2026 Jos Verstraten)

De kanaalafstand bij AM (frequentieraster)

Uit het feit dat er twee zijbanden aanwezig zijn volgt dat de bandbreedte van een AM-signaal gelijk is aan twee keer de bandbreedte van het te moduleren signaal. Dit stelt een beperking aan de frequenties van de draaggolven van twee AM-gemoduleerde signalen die via één medium worden verstuurd. De hoge zijband van de AM-signaal met de laagste draaggolf frequentie mag niet interfereren met de lage zijband van de draaggolf met de hoogste frequentie. Dit wordt voorgesteld in de onderstaande figuur.

Bij radiozenders die met AM worden gemoduleerd zijn er internationale afspraken gemaakt over de bandbreedte van het uit te zenden signaal en de minimale frequentie-afstand tussen de draaggolven van de zenders. Dit noemt men het '*frequentieraster*' van de AM-banden. Dit frequentieraster is vastgelegd in internationale afspraken via de International Telecommunication Union (ITU).
De bandbreedte van het te moduleren signaal wordt beperkt tot 4,5 kHz. Het gevolg is dat de bandbreedte van het zendersignaal 9,0 kHz is en de draaggolven ook 9,0 kHz uit elkaar kunnen liggen. Dit geldt voor Europa, voor Amerika heeft men een afstand van 10 kHz vastgesteld.



Het frequentieraster bij AM in Europa. (© 2026 Jos Verstraten)

Zenders met identieke draaggolf frequentie
Er waren ooit zoveel AM-zenders in de lucht dat deze niet allemaal in het frequentieraster pasten en er dus doublures optraden wat betreft draaggolf frequentie. Ook wat dit betreft zijn afspraken gemaakt, die meestal de landsgrenzen overschrijden. De minimale letterlijke afstand tussen twee zenders met dezelfde draaggolf frequentie hangt af van het vermogen van de zenders:
- 1 kW: 150 km tot 250 km
- 10 kW: 250 km tot 400 km
- 50 kW: 400 km tot 800 km

Voor- en nadelen van AM
De voordelen van amplitude modulatie zijn:

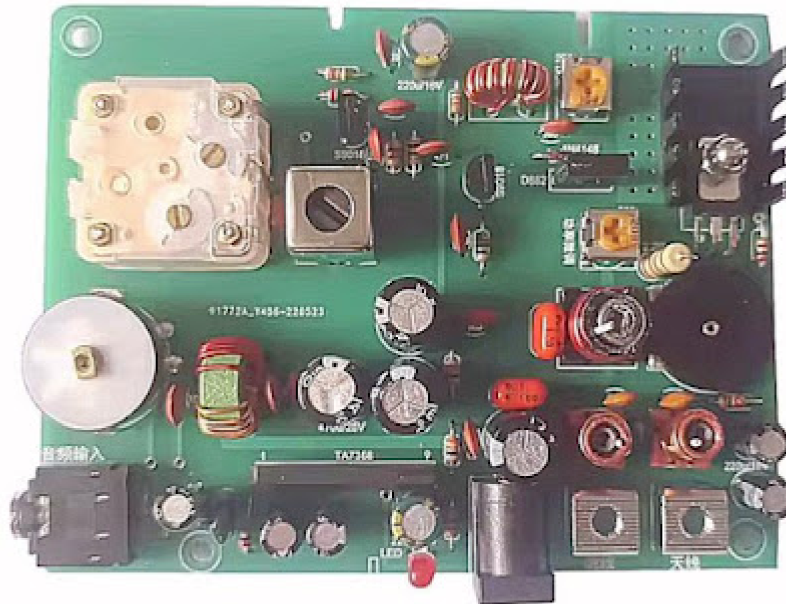
- Eenvoudige elektronica voor modulatie en demodulatie. Hierdoor zijn AM-ontvangers goedkoop, robuust en eenvoudig te bouwen.
- Grote dekking, vooral op middengolf en langegolf. Hierdoor zijn zeer grote afstanden mogelijk met relatief beperkt zendvermogen.
- Analoge compatibiliteit, dus compatibel met zeer oude apparatuur. Dit maakt AM geschikt voor eenvoudige communicatiesystemen en noodzenders.

De nadelen van amplitude modulatie zijn:

- Zeer slecht vermogensrendement. Men kan berekenen dat niet minder dan 2/3 van het uitgezonden vermogen in de draaggolf zit.
- Amplitude modulatie is zeer gevoelig voor ruis- en stoorsignalen. De ontvanger is niet in staat deze te onderscheiden van de nuttige informatie.
- Zeer slechts muziekkwaliteit vanwege de zeer kleine bandbreedte van 4,5 kHz.

Toepassingen van AM
AM wordt tegenwoordig vooral nog gebruikt in:
- Luchtvaartcommunicatie (VHF-AM).
- Sommige nog bestaande middengolf omroepzenders.
- Historische- en hobbytoepassingen.
- Lange-afstand systemen waar dekking belangrijker is dan kwaliteit.

AM-zender kit
Via de bekende Chinese internetkanalen zijn diverse bouwpakketjes van AM-zenders te koop. In de onderstaande foto ziet u zo' n zender, die instelbaar is op een draaggolf frequentie tussen 530 kHz en 1.600 kHz. Het bouwpakketje kost ongeveer € 15,00. De schakeling levert, bij een voedingsspanning van 9,0 V_{dc}, ongeveer 400 mW zendvermogen.



Een goedkoop AM-zendertje om mee te experimenteren. (© AliExpress)

Enkelzijband modulatie (SSB)

Hoe werkt het?
De Engelse term is '***S**ingle **S**ide**b**and*', vandaar de afkorting SSB. Enkelzijband modulatie is een efficiënte vorm van AM, waarbij slechts één zijband van het gemoduleerde signaal wordt uitgezonden. De draaggolf en de andere zijband worden onderdrukt. In die ene zijband zit immers alle informatie van het te moduleren signaal. Meer heeft de ontvanger dus niet nodig om het signaal te kunnen reconstrueren. Het zal duidelijk zijn dat SSB zeer efficiënt werkt, omdat nu het volledige zendvermogen zit in de ene zijband die wordt uitgezonden. Bovendien is de bandbreedte nu gelijk aan de bandbreedte van het te moduleren signaal, waardoor de draaggolven veel dichter bij elkaar kunnen liggen of de frequentie-as.

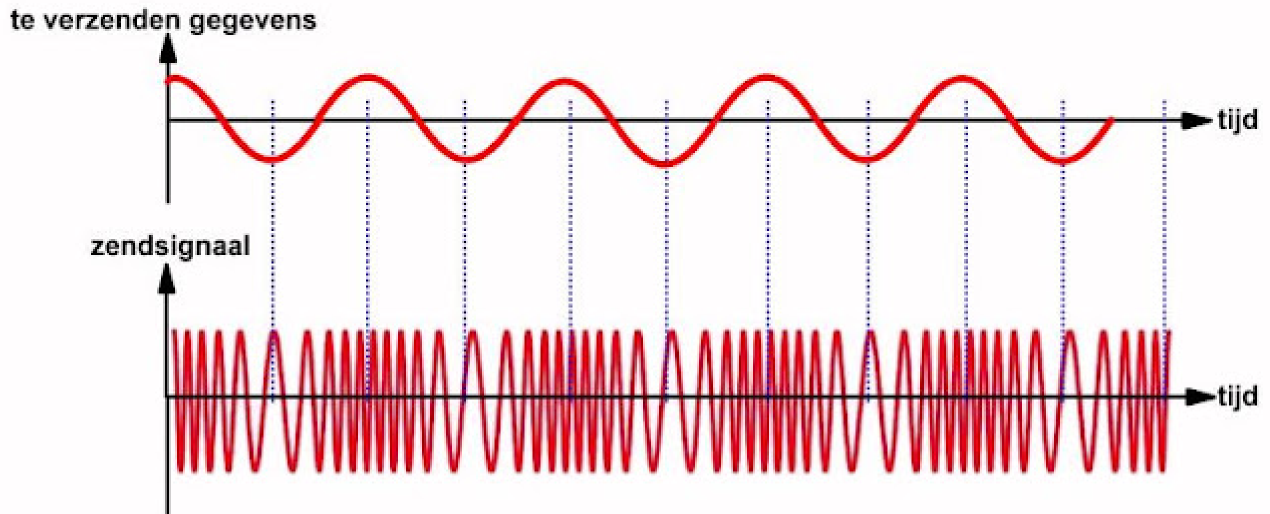
Twee varianten
Er zijn twee afspraken:
- '***U**pper **S**ide **B**and*' (USB): Hierbij wordt de bovenste zijband uitgezonden.
- '***L**ower **S**ide **B**and*' (LSB): Hierbij wordt de onderste zijband uitgezonden.

Bij de amateurbanden die uitzenden onder 10 MHz wordt meestal LSB toegepast.

Toepassingen van SSB
Vanwege de hoge efficiëntie en de lage bandbreedte wordt SSB vaak toegepast bij:
- HF-communicatie.
- Maritieme communicatie.
- Luchtvaart communicatie.
- Militaire communicatie.
- Amateur-radio.

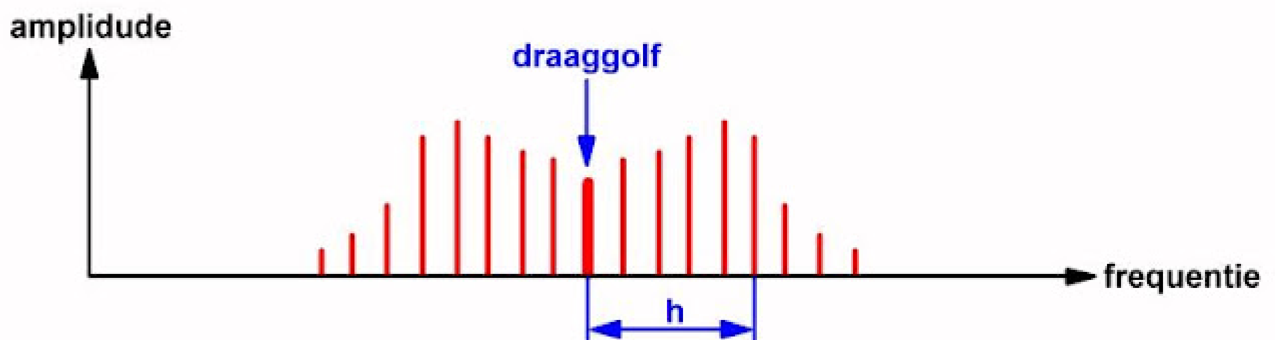
Frequentie modulatie (FM)

Hoe werkt het?
Bij FM zit de laagfrequent informatie niet verborgen in de amplitude van de draaggolf. Deze wordt constant gehouden. Zoals uit de onderstaande figuur blijkt zit de LF-informatie in de frequentie-afwijking tussen de momentane waarde van de frequentie van de draaggolf en de frequentie van het ongemoduleerde draaggolfsignaal. Door het moduleren gaat de frequentie van het signaal symmetrisch rond deze waarde schommelen. Een positief LF-signaal heeft een frequentiestijging tot gevolg, een negatief LF-signaal een frequentiedaling. Dit noemt men de '*frequentie-deviatie*' van het FM-signaal.



Het principe van frequentie modulatie. (© 2026 Jos Verstraten)

Frequentiespectrum van FM-modulatie
Ook nu heeft de draaggolf een veel hogere frequentie dan de LF-informatie en heeft een sinusvormig verloop. De LF-informatie kan iedere gewenste vorm hebben.
Bij een harmonische fourier-analyse van een FM-signaal blijkt dat dit een veel ingewikkelder frequentiesamenstelling heeft dan een AM-signaal. Ook nu ontstaan zijbanden, maar veel meer dan de twee van AM. Deze zijbanden liggen symmetrisch ten opzichte van de frequentie van de ongemoduleerde draaggolf. In de onderstaande figuur is het frequentiespectrum getekend van een FM-signaal dat gemoduleerd wordt met een sinusoidaal LF-signaal. De dik getekende frequentie in het midden is de frequentie van de draaggolf. Het aantal zijbanden is afhankelijk van de mate van modulatie van de draaggolf. Hoe groter het verschil tussen de laagste en de hoogste uitgezonden frequentie, met andere woorden hoe groter de deviatie, hoe meer zijbanden er aanwezig zijn.



Het frequentiespectrum van een met FM gemoduleerde sinus. (© 2026 Jos Verstraten)

De modulatiediepte h bij FM
Ook bij FM kan men het begrip modulatiediepte definiëren. De modulatiediepte, nu aangegeven met de letter h, is de grootste frequentie-afwijking van het FM-signaal ten opzichte van de frequentie van de ongemoduleerde draaggolf. De totale frequentiezwaai van de draaggolf bedraagt dus 2 • h.

In de praktijk zal men h minstens vijf maal hoger maken dan de maximale frequentie van de LF-informatie. Gebruikt men het FM-signaal voor het uitzenden van muziek, dan beperkt men de bandbreedte van het muzieksignaal tot 15 kHz en moduleert met een h van 75 kHz. Dat betekent dat de frequentiezwaai op het FM-signaal 150 kHz zal bedragen als de LF-informatie de maximale amplitude heeft.

Voor- en nadelen van FM

Het grote voordeel van FM ten opzichte van AM is dat het gemoduleerde signaal veel ongevoeliger is voor storingen. Storingen op een signaal uiten zich voornamelijk in amplitude-afwijkingen. AM is daar zeer gevoelig voor, FM in veel mindere mate. Natuurlijk wil dat niet zeggen dat FM helemaal niet gevoelig is voor storingen! Naast een duidelijk merkbare amplitude-aantasting heeft iedere stoorpuls ook invloed op de frequentiesamenstelling van het gestoorde signaal. En voor die frequentie-aantasting is ook FM helaas gevoelig. Maar men kan deze gevoeligheid aanzienlijk verkleinen door het gebruiken van limiter-schakelingen in de ontvanger.
Een tweede groot voordeel van FM bij gebruik van audio-transmissie is de veel betere kwaliteit en het groter dynamisch bereik.
Een nadeel van FM is dat er een veel grotere bandbreedte voor nodig is en als gevolg daarvan men met veel hogere draaggolf frequenties moet werken. Het bereik van deze frequenties is veel kleiner dan deze van de veel lagere AM draaggolven.

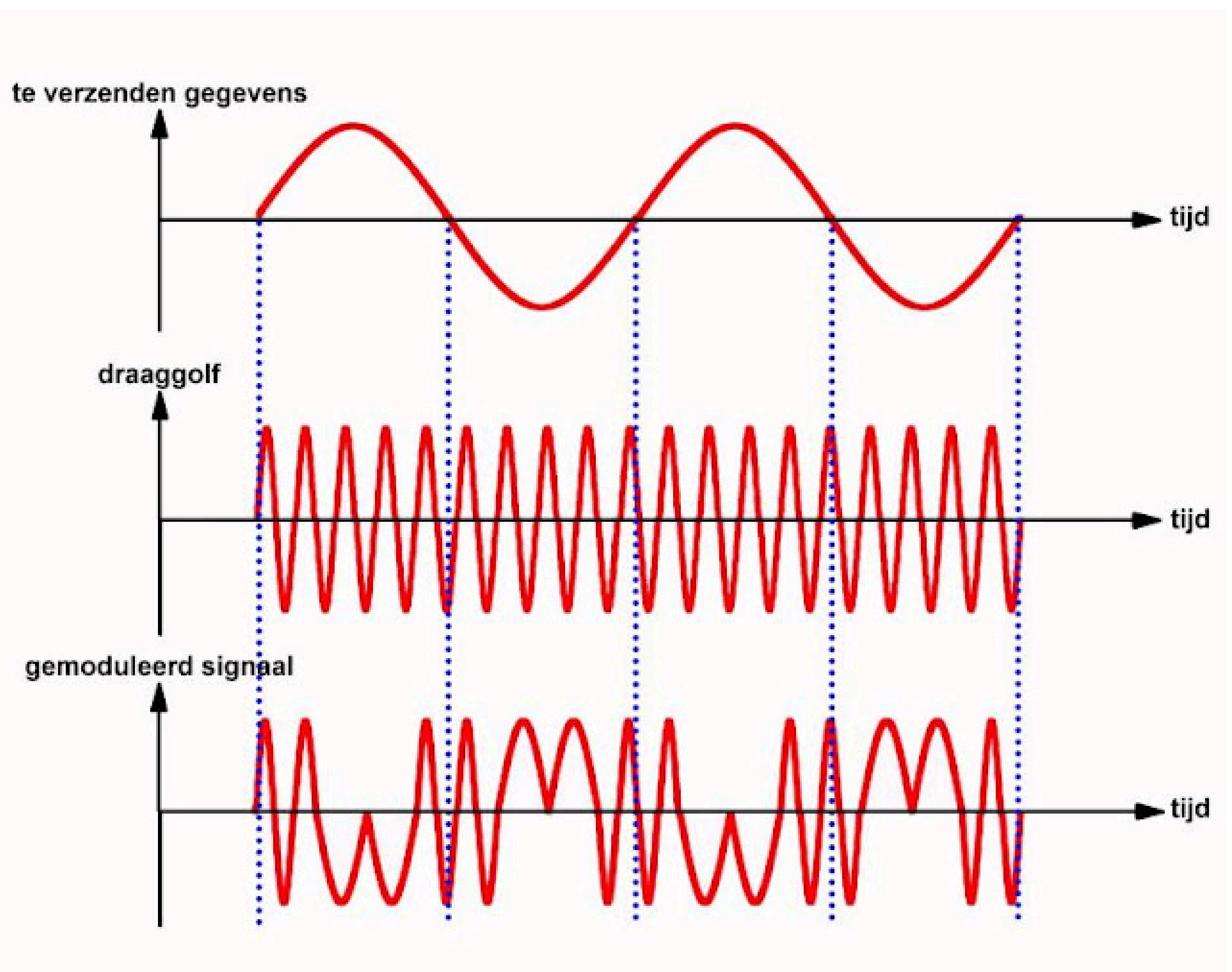
Toepassingen van FM

Zoals bekend werd FM gebruikt voor het opbouwen van een fijnmazig radio-netwerk dat audio van uitstekende kwaliteit in ieders huiskamer en auto bracht en brengt. Helaas zijn er adviezen om FM vanaf 2027 geleidelijk uit te faseren en volledig te vervangen door DAB (*__D__igital __A__udio __B__roadcasting*). Echter, de overheid verstrekt en verlengt nog steeds FM-licenties, wat wijst op continuering van FM-uitzendingen tot minstens 2035. Zolang het luisteraandeel via FM nog aanzienlijk is, blijft het netwerk in stand, mede vanwege de rol van de analoge FM-radio tijdens noodsituaties.
In tegenstelling tot Nederland heeft Vlaanderen wel een richtdatum gesteld. Men wil het FM-netwerk op 1 januari 2031 uitschakelen.

Fase modulatie (PM)

Hoe werkt het?

Fase-modulatie (PM) is een analoge modulatievorm waarbij de fase van een draaggolf wordt gevarieerd in functie van het informatiesignaal, waarbij de amplitude constant blijft. Bij een positieve waarde van het informatiesignaal wordt de fase vooruit verschoven, bij een negatieve waarde achteruit. Het is nogal moeilijk om een in fase gemoduleerd signaal op papier voor te stellen. In de onderstaande figuur hebben wij tóch een poging ondernomen.



Het principe van fase-modulatie. (© 2026 Jos Verstraten)

Voor- en nadelen van fasemodulatie
Analoge PM minder gevoelig voor amplitude-ruis dan AM, omdat de informatie in de hoek van de draaggolf zit en de draaggolf word verzonden met een constante amplitude. De bandbreedte van een gemoduleerd signaal kan echter vrij groot worden. De noodzakelijke schakelingen zijn echter complexer dan deze die voor analoge FM noodzakelijk zijn. Dat is de voornaamste reden van PM nooit is doorgebroken in de radio-techniek.

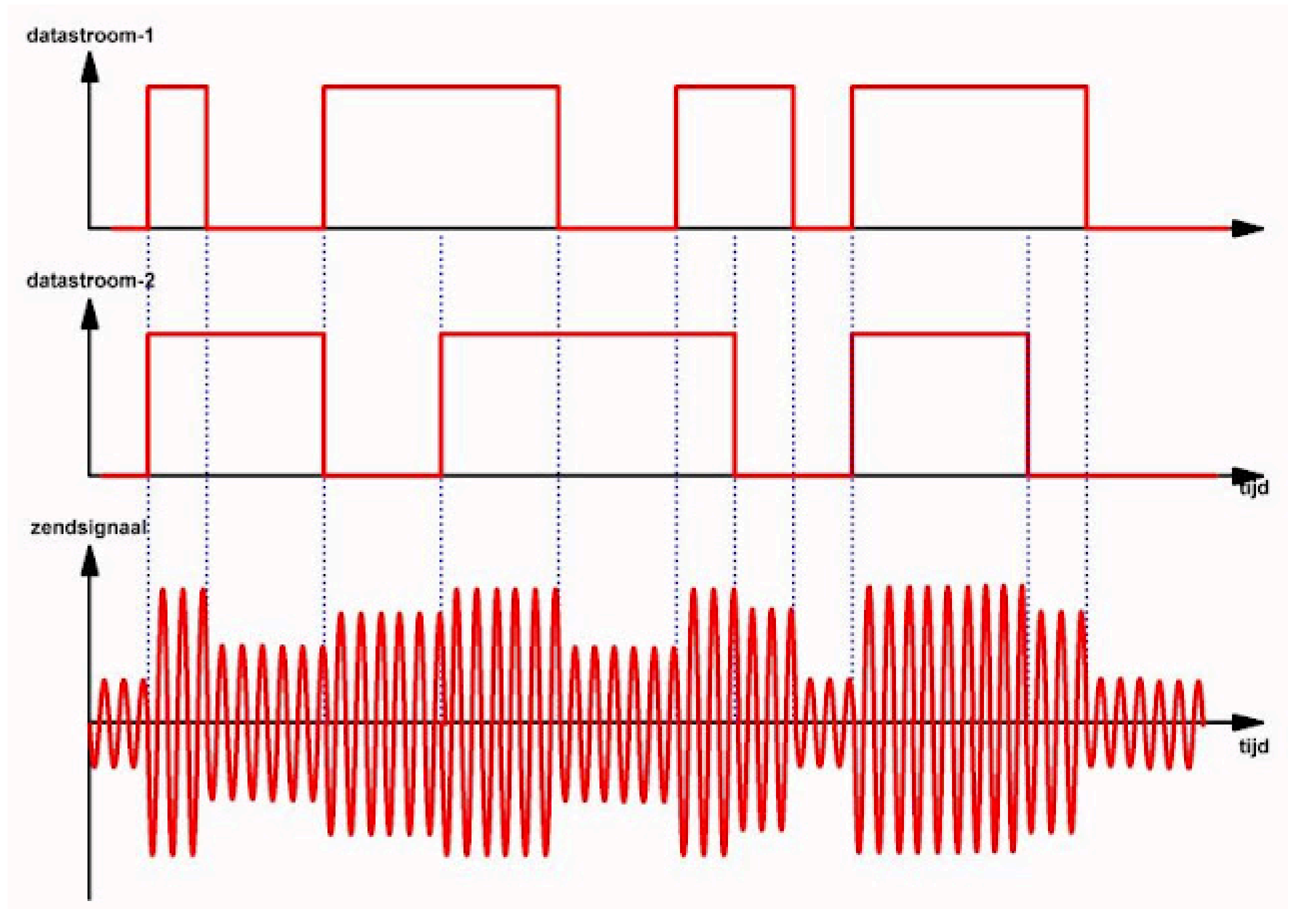
Toepassingen van PM
Analoge fase-modulatie wordt tegenwoordig nauwelijks gebruikt. Historisch bekeken werd analoge PM vaak gebruikt bij satelliet communicatie en ruimtevaart telemetrie. Vermeldenswaard is dat analoge PM werd toegepast bij de geluidsynthese in de Yamaha DX7.

Amplitude shift keying (ASK)

Hoe werkt het?
Amplitude shift keying werkt door een of meerdere digitale bitstromen te coderen via veranderingen in de amplitude van een sinusoidale draaggolf. Het is dus een uitgebreidere vorm van on-off keying (OOK), waarbij diverse uitgezonden signaalniveaus overeenkomen met bepaalde combinaties van digitale signalen. Die combinaties van digitale signalen worden '*symbolen*' genoemd. In de onderstaande grafiek is als voorbeeld een ASK-systeem voorgesteld dat in staat is twee datastromen te coderen op één sinusoidale draaggolf. Er worden vier verschillende amplitudes gedefinieerd, die worden toegekend aan vier verschillende symbolen:

- Amplitude A: symbool 'H-H'

- Amplitude B: symbool 'H-L'
- Amplitude C: symbool 'L-H'
- Amplitude D: symbool 'L-L'



Een ASK-systeem dat vier digitale symbolen moduleert op één draaggolf.
(© 2026 Jos Verstraten)

Voor- en nadelen van amplitude shift keying
Het voordeel van ASK is dat het aan de zenderzijde vrij weinig elektronica vraagt. Het decoderen van het gemoduleerde signaal vraagt echter veel complexere schakelingen. Het onderscheiden van diverse analoge signaalniveaus is immers niet zo eenvoudig! Een ander nadeel van ASK is dat het extreem gevoelig is voor ruis en andere storingsbronnen die de integriteit van de diverse signaalniveaus kunnen aantasten.

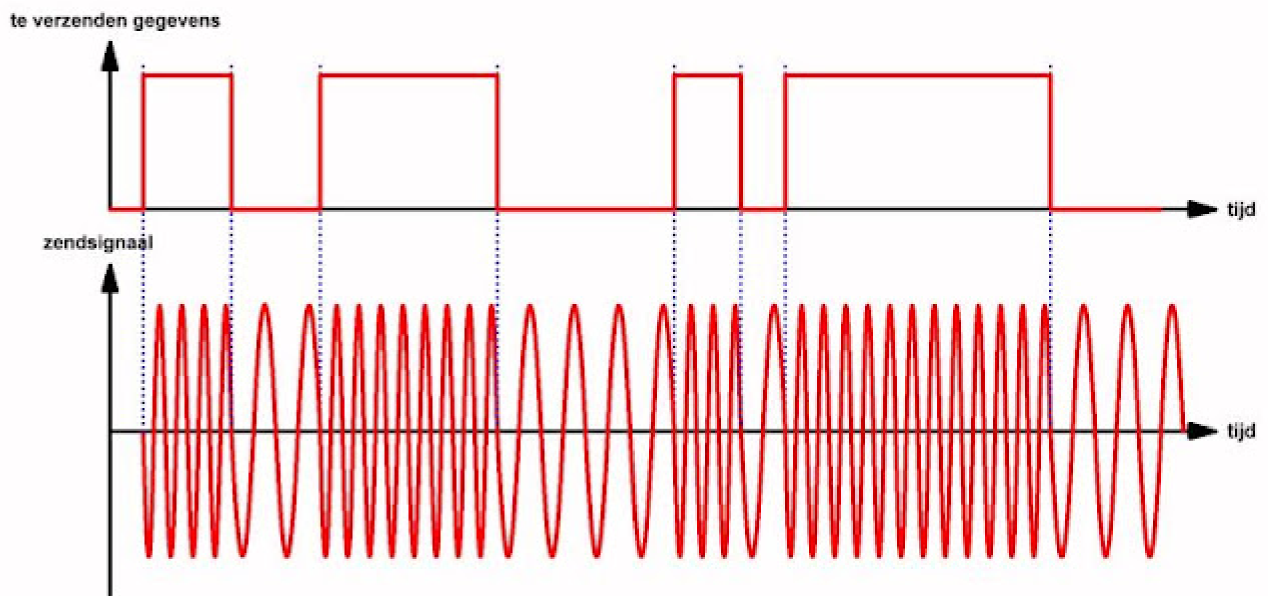
Toepassingen van ASK
Op zich wordt ASK niet vaak toegepast. Dit modulatiesysteem ligt echter aan de basis van de ontwikkeling van '*__Q__uadrature __A__mplitude __M__odulation*' (QAM). Deze analoge modulatievorm is nu dé standaard voor het transporteren van audio, video en internet via de kabel.

Frequency shift keying (FSK)

Hoe werkt het?
Frequency shift keying is een digitale modulatiemethode waarbij de frequentie van de draaggolf verandert om een seriële digitale datastroom te coderen. In de praktijk wordt meestal gewerkt met BFSK (Binary FSK) waarbij slechts twee verschillende frequenties worden gebruikt:
- Bit = 'L' → frequentie f_1
- Bit = 'H' → frequentie f_2

Naarmate het verschil tussen f_1 en f_2 toeneemt wordt het systeem betrouwbaarder, maar neemt de bandbreedte toe.

In de onderstaande figuur is het basisprincipe van FSK voorgesteld.



Het principe van FSK. (© 2026 Jos Verstraten)

MFSK (Multi FSK)
Naast BFSK bestaat ook MFSK (Multi FSK) waarbij vier of meerdere digitale symbolen worden gemoduleerd door gebruik te maken van vier verschillende draaggolf frequenties.

GFSK (Gaussian FSK)
Bij de besproken FSK-modulatie verspringt de frequentie van de draaggolf bij de overgang van een 'L' naar een 'H' bit onmiddellijk van f_1 naar f_2. Deze abrupte overgangen bevatten veel HF-harmonischen die tot gevolg hebben dat de bandbreedte van het gemoduleerde signaal erg groot wordt. Bij GFSK wordt de overgang van f_1 naar f_2 (en uiteraard van f_2 naar f_1) geleidelijk doorgevoerd. Hierdoor verdwijnen de hoge harmonischen uit het signaal en neemt de bandbreedte af. Het gevolg is dat er in een beschikbare frequentieband meer GFSK-signalen kunnen worden ondergebracht.

Voor- en nadelen van frequency shift keying
Het grote voordeel van FSK is de grote ongevoeligheid voor amplitude-verstoringen en ruis. Een tweede voordeel is dat vooral binary FSK op een heel eenvoudige manier in praktische elektronica kan worden omgezet. Een simpele VCO (***V****oltage* ***C****ontrolled* ***O****scillator*) volstaat voor het genereren van de gemoduleerde draaggolf. Een nadeel van standaard FSK is de grote bandbreedte, maar zoals beschreven kan dit worden opgelost door het toepassen van GFSK.

Toepassingen van FSK
Klassieke FSK wordt bijvoorbeeld gebruikt bij sommige garagepoort-opener systemen, lage-snelheid draadloze sensornetwerken en bij marine- en luchtvaart-communicatie. Ook bij RFID-systemen wordt gebruik gemaakt van FSK.
Gaussian FSK wordt onder andere toegepast bij Bluetooth Classic, DECT (draadloze huistelefoons) en GSM. Bij GSM wordt echter gebruik gemaakt van een speciale vorm van GFSK, namelijk '***G****aussian* ***M****inimum* ***S****hift* ***F****requency* ***K****eying*' (GMSFK). Dit systeem verlaagt de bandbreedte nog verder, waardoor er meer kanalen in de beschikbare frequentieband passen.

Audio frequency shift keying (AFSK)

Hoe werkt het?

Audio frequency shift keying is een speciale vorm van FSK waarbij de twee frequenties f_1 en f_2 in de audio-band liggen. Op deze manier kan het gemoduleerde signaal via ouderwetse koperen telefoonlijnen wereldwijd worden verzonden. Elektronici van een bepaalde leeftijd kennen AFSK maar al te goed. Het was hét modulatiesysteem waarmee telefoonmodems via de analoge telefoonlijn contact onderhielden met het internet. AFSK-signalen kunnen ook worden gemoduleerd op een HF-draaggolf en dan bijvoorbeeld worden gebruikt voor satelliet communicatie of bij packet-radio.



Een ouderwets telefoon-modem dat met AFSK werkte. (© transistorforum)

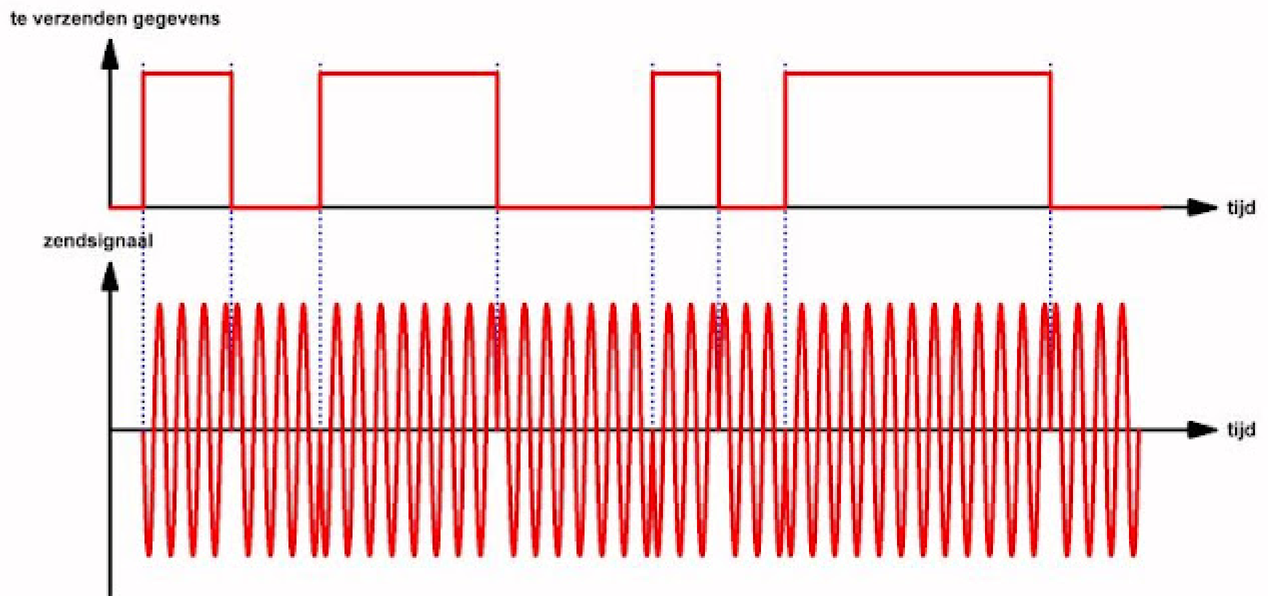
De frequenties
Een veel gebruikte standaard is de Bell 202. Die maakt gebruik van 1.200 Hz voor een 'H' en 2.200 Hz voor een 'L' bij een baudrate van 1.200.
De oude telefoonmodems werkten met de Bell 103 standaard met als frequenties 1.070 Hz en 1.270 Hz voor communicatie in de ene richting en 2.025 Hz en 2.225 Hz voor communicatie in de andere richting. De snelheid bedroeg slechts 300 baud.

Toepassingen van AFSK
Het systeem wordt, gemoduleerd op een HF-draaggolf, veel gebruikt door radio-amateurs voor digitale modi zoals packet-radio. Ziggo gebruikt AFSK voor de nummerweergave bij telefonie.

Cassette-opslag
Een belangrijke oude toepassing die nog moet worden vermeld is dat het systeem bij de allereerste generatie home-computers, zoals de Commodore 64 en de Sinclair Spectrum, werd gebruikt om programma's en data op te slaan op gewone audio-cassettes. Hiervoor werd de Kansas City-standaard toegepast. Een 'L' werd voorgesteld door vier perioden van een 1,2 kHz sinussignaal, een 'H' door acht perioden van een identiek signaal van 2,4 kHz.

Phase shift keying (PSK)

Hoe werkt het?
Phase shift keying is een modulatietechniek waarbij de fase van een sinusoidale draaggolf wordt gevarieerd om digitale gegevens over te dragen. De amplitude en de frequentie van de draaggolf blijven hierbij constant.



Het principe van phase shift keying. (© 2026 Jos Verstraten)

Verschillende varianten
Er zijn diverse varianten ontwikkeld, afhankelijk van hoeveel bits per stap worden gemoduleerd:

- Binary PSK (BPSK):
  Deze methode werd reeds besproken, het is de eenvoudigste vorm met twee fasen (0° en 180°), waarbij elke fase precies één bit ('L' of 'H') vertegenwoordigt.
- Quadrature PSK (QPSK):
  Hierbij worden vier verschillende fasen (45°, 135°, 225°, 315°) toegepast, waardoor er twee bits per symbool worden gemoduleerd.
- 8PSK:
  Gebruikt acht verschillende fasen om drie bits per symbool te moduleren, waardoor de datasnelheid wordt verhoogd zonder verbreding van de bandbreedte.

Voordelen van phase shift keying
Het systeem heeft een goede energie-efficiëntie en kan vrij eenvoudig in praktische elektronica worden omgezet. De constante amplitude en frequentie zijn gunstig voor de instelling van HF vermogensversterkers.

Toepassingen van PSK
PSK wordt vaak gebruikt in moderne communicatietechnologieën vanwege de zeer grote efficiëntie:

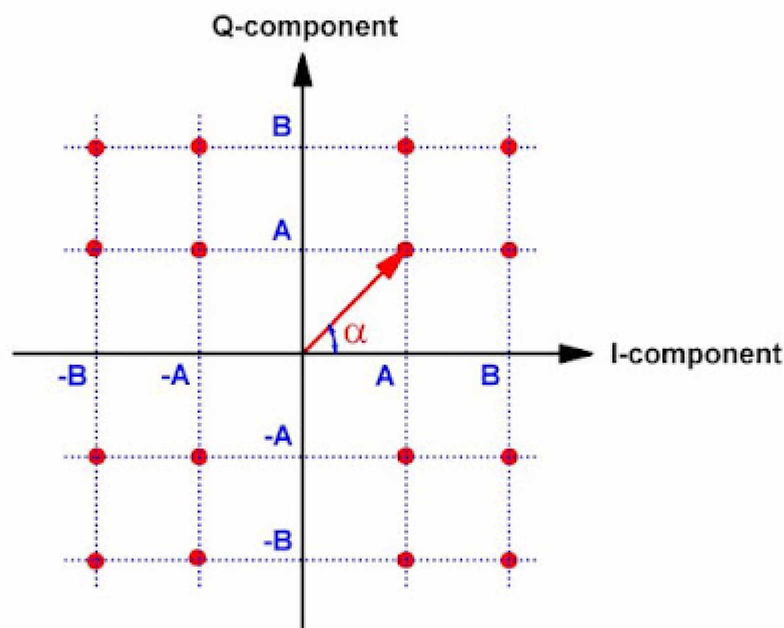
- Draadloze netwerken:
  Wi-Fi en Bluetooth maken gebruik van verschillende PSK-vormen.
- Satelliet communicatie:
  Veel gebruikt voor het verzenden van digitale televisie (DVB-S2) en breedband internet via satelliet.
- Mobiele netwerken:
  PSK is onderdeel van de complexe modulatietechnieken in 4G (LTE) en 5G.

Quadrature amplitude modulation (QAM)

Hoe werkt het?

Quadrature amplitude modulation is een modulatiemethode waarbij wordt gewerkt met twee primaire draaggolven. Die hebben dezelfde frequentie, maar zijn 90° in fase verschoven. De eerste wordt het '*I-component*' (In-phase) genoemd, de tweede het '*Q-component*' (Quadrature).
QAM verwerkt digitale symbolen, die een combinatie van digitale datastromen bevatten. In de eenvoudigste uitvoering, 16-QAM, worden vier bits in één symbool gemoduleerd. Twee bits worden gecodeerd in de amplitude van het I-component, twee in de amplitude van het Q-component. Twee bits zijn te definiëren in vier diverse amplitudes van het signaal. 16-QAM moduleert dus de zestien mogelijke combinaties van de vier bits ondubbelzinnig in vier amplitudes van het I-component en even veel amplitudes van het Q-component.
Nadien maakt de modulator een signaal aan dat bestaat uit de som van beide primaire componenten. Dit is geen zuivere sinus meer, maar een signaal dat een heleboel harmonischen bevat en uniek is voor de gecodeerde bit-combinatie. Dit signaal wordt uitgezonden als secundaire gemoduleerde draaggolf met een bepaalde fasehoek α. Bij de volgende periode van het modulatieproces kan de draaggolf er dus totaal anders uitzien!

Het constellatiediagram
Vanwege de complexiteit van de secundaire gemoduleerde draaggolf is QAM niet meer goed voor te stellen onder de vorm van een oscillogram. Men gebruikt in de plaats daarvan het zogenaamde '*constellatiediagram*'. Dat is een assenkruis waarin horizontaal de amplitude van het I-component wordt voorgeteld en verticaal de amplitude van het Q-component. De zestien mogelijke combinaties van 16-QAM worden in dat diagram voorgesteld door punten. Ieder punt stelt een unieke combinatie (= symbool) voor van de vier bits. In de onderstaande figuur is dat getekend. De mogelijke amplitudes worden in dit diagram voorgesteld door de waarden A, B, -A en -B.



Het constellatiediagram van 16-QAM. (© 2026 Jos Verstraten)

Een voorbeeld van 16-QAM
Stel dat het digitale symbool 'H-L-H-H' moet worden gemoduleerd. Dit symbool wordt toegekend aan beide componenten:
- I-component: 'H-L'
- Q-component: 'H-H'

Vervolgens moeten de vier beschikbare amplitudes worden gedefinieerd, bijvoorbeeld als:
- Bit-combinatie 'L-L': -3 V
- Bit-combinatie 'L-H': -1 V
- Bit-combinatie 'H-L': +1 V
- Bit-combinatie 'H-H': +3 V

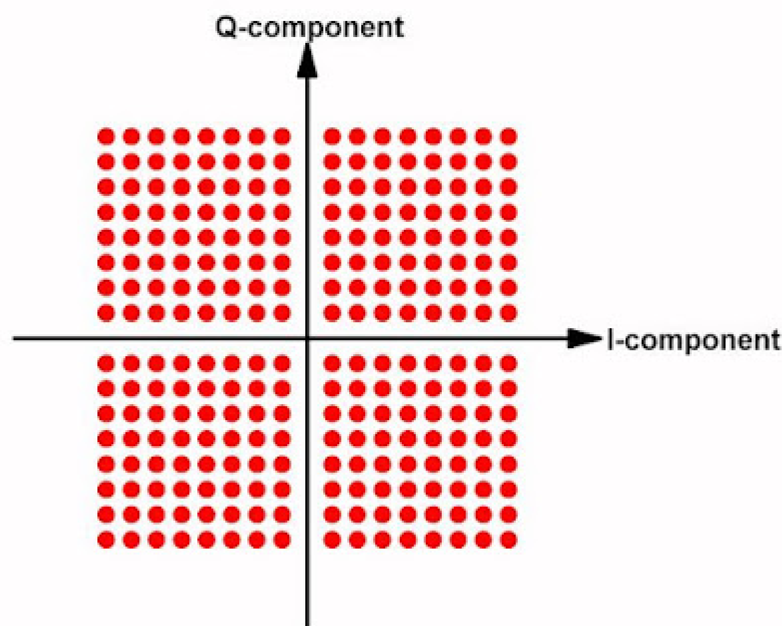
Die waarden worden toegekend aan beide componenten:

- I = 'H-L' → +1 V
- Q = 'H-H' → +3 V

De zender maakt nu de secundaire draaggolf uit beide signalen en zendt dit uit met een bepaalde fasehoek α. Die hoek wordt bepaald door de helling van de vector die vanuit het nulpunt naar het betreffende punt in het constellatiediagram kan worden getekend.

64-QAM
De volgende stap van moduleren is 64-QAM. Hierbij kunnen 64 verschillende toestanden worden gecodeerd, waardoor er zes bits per symbool kunnen worden verzonden. Dit is een zeer efficiënte manier voor het verzenden van digitale data. Deze modulatiemethode wordt dan ook bij de downstream van kabelmodems toegepast. Deze methode is wel voor de downstream, maar niet voor de upstream mogelijk, omdat bij de downstream tussenversterkers worden toegepast, waardoor het signaal in een betere conditie bij de eindgebruiker kan worden afgeleverd.

256-QAM
Tegenwoordig wordt ook 256-QAM toegepast, hetgeen weer een opwaardering is van het aantal aan te nemen toestanden in het diagram. Deze modulatiemethode is de hoogste die wordt toegepast bij kabelmodems en daarmee ook de gevoeligste van de modulatiemethoden. Het signaal moet behoorlijk zuiver zijn voor een foutloze toestandsherkenning. Met deze modulatiemethode kunt u, doordat er 256 mogelijkheden zijn, acht bits per symbool versturen. Dit komt dus overeen met één byte per symbool.



Het constellatie diagram van 256-QAM. (© 2026 Jos Verstraten)

De voor- en nadelen van QAM
QAM heeft een zeer hoge spectrale efficiëntie, wat betekent dat er een zeer hoge datasnelheid binnen een beperkte bandbreedte mee kan worden gerealiseerd.
Adaptieve modulatie is mogelijk, hetgeen betekent dat de systemen dynamisch kunnen omschakelen van bijvoorbeeld 256-QAM naar 64-QAM als er opeens veel storing in de ontvangst optreedt. Op die manier kan er een optimale balans tussen snelheid en betrouwbaarheid worden gezocht.
Het grote nadeel van QAM is uiteraard dat het omzetten naar praktische elektronica heel complex is. Het is absoluut noodzakelijk digitale signaalprocessors in te schakelen om de complexe signaalbewerkingen snel door te voeren. De demodulatie vereist zeer nauwkeurige fase- en amplitudesynchronisatie, zeker bij de hoge-orde systemen.

Toepassingen van quadrature amplitude modulation
QAM wordt in alle moderne communicatiesystemen toegepast. Om er een paar te noemen:

- Wi-Fi met modulaties 64-QAM, 256-QAM en zelfs 1024-QAM.
- Mobiele netwerken 4G en 5G met snelheden van 16-QAM tot en met 1024-QAM.
- Digitale televisie met snelheden tot 256-QAM.
- Internet, telefonie en TV via de kabel met snelheden tot 256-QAM.

QAM is dus de standaardmodulatie voor vrijwel alle moderne breedband communicatiesystemen.